doi:10.13866/j.azr.2019.05.28

甘肃泾川中沟小流域不同坡位刺槐人工林土壤水分特征①

张晓梅[1]，邸　利[1]，史再军[2]，费俊娥[1]，王正安[3]

（1. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州　730070；2. 泾川县官山林场，甘肃 泾川　744306；
3. 宁夏农林科学院固原分院，宁夏 固原　756000）

摘　要： 以甘肃泾川中沟小流域不同坡位刺槐人工林为研究对象，采用环刀法测定人工刺槐林土壤水文物理性质，采用烘干法测定土壤水分。方差分析表明：不同坡位土壤物理性质存在显著差异，0～100 cm 土层的土壤容重为：塬面刺槐林（上）（1.24 $g \cdot cm^{-3}$）> 塬面刺槐林（下）（1.20 $g \cdot cm^{-3}$）> 沟台刺槐林（1.18 $g \cdot cm^{-3}$）> 墚坡刺槐林（1.16 $g \cdot cm^{-3}$）。土壤总孔隙度为：墚坡刺槐林（51.99%）> 沟台刺槐林（51.31%）> 塬面刺槐林（下）（50.52%）> 塬面刺槐林（上）（49.33%），墚坡刺槐林饱和持水量与非毛管持水量均最大，沟台刺槐林与塬面刺槐林（下）次之，塬面刺槐林（上）最小。各林地土壤水分变化季节性差异明显，可分为土壤水分消耗期（5—6 月）、补给期（7 月）、消退期（8—9 月）。不同林地土壤含水量变异系数随土层深度加深表现为先增大后减小，土壤水分变异系数在 40～80 cm 处达到最大值（Cv > 0.3）。表明塬面刺槐林（上）的土壤含水量最大，塬面刺槐林（下）与沟台刺槐林居中，墚坡刺槐林土壤水分最低。

关键词： 刺槐；人工林；土壤水分；水文物理性质；坡位；动态变化；甘肃

水分作为影响植物个体发育与植物类型的基本生态因子之一，对植被分布有重要影响[1]。黄土高原地处我国西北干旱、半干旱区，地上土壤水分补给主要靠降水，由于地处内陆降水较少且分布不均，蒸发量远高于降水量，加之黄土土层深厚，地下水埋藏较深，土壤水分长期处于亏缺状态，导致生态环境极度脆弱，土壤水分已是制约黄土区生态环境建设的关键问题[2]。复杂多样的地貌类型使不同地形部位和不同植被类型的土壤水分产生时空差异，因此，对作为森林生态系统重要组成部分的森林土壤水分的研究具有重要意义[3]。

刺槐作为黄土高原主要的涵养水源、水土保持树种，因其耐旱、速生的特征适合大面积营造，同时刺槐根系耗水性较强，导致水资源匮乏的黄土高原地区在刺槐林营造中出现土壤干层、“小老树”等问题，水土保持林防护效益较差[4]。森林土壤水分动态不仅受林分组成、林龄、郁闭度等林分特征的影响，更受气候、地形及土壤水文物理性质的影响。前人对黄土高原土壤水分与刺槐生长关系已有大量研究。韩恩贤等[5]发现，不同立地条件下的刺槐林生长与土壤水分相关性紧密（r 为 0.869 1～0.990 6）。黄艳丽等[6]对黄土高原小流域不同坡面土壤水分研究得出，坡脚土壤含水率优于坡腰，坡腰优于坡肩；董起广等[7]对延安市典型黄土坡面土壤水分研究发现，随坡位下降土壤水分增大，下坡位含水率比上坡位高出 5.33%；韩芬等[8]对泾川县中沟小流域不同立地刺槐林穿透雨对降雨的响应发现，地形部位和坡向对穿透雨影响显著，坡位影响不显著；甘淼等[9]对陕北黄土高原坡沟土壤含水量变化的研究表明，地形部位对土壤含水率具有显著影响。大量研究表明[10-12]，坡位不同则土壤水分分布不同，同一坡位坡下部土壤水分显著高于坡上部。本文以泾川县中沟小流域刺槐人工林为研究对象，以土壤水分变化为重点，选取塬面、墚坡、沟台 3 个坡位的 4 个刺槐人工林样地，并结合各样地土壤水文物理性质指标，分析刺槐人工林年生长季中土壤水分季节及垂直变化规律，以期为该地区水资源管理与刺槐人工林生态植被恢复与建设提供理论依据。

① **收稿日期：** 2018-12-20；**修订日期：** 2019-03-04
基金项目： 国家自然科学基金项目（31660235，41461112）资助
作者简介： 张晓梅（1991-），女，硕士研究生，主要从事森林生态水文方向研究. E-mail：2248530337@qq.com
通讯作者： 邸利. E-mail：dili@gsau.edu.cn

1 研究区概况

实验区位于陇东黄土高原泾川县官山林场中沟小流域(107°30′~107°31′E,35°19′~35°20′N),全区面积2.09 km^2,地貌类型有4大类:塬面、墚坡、沟台和沟谷,海拔1 072~1 351 m,是典型的黄土丘陵沟壑区,局部有一些破碎塬。黑垆土、黄绵土、褐土广泛分布,成土母质为原生黄土和次生黄土。森林覆盖率为37.13%,林地面积5 420 km^2,官山林场有以刺槐为主的人工林面积13.27 km^2。属大陆性气候,年平均气温10 ℃,年日照时数2 315.4 h,无霜期174 d,降雨量分布不均且年际变化大,降雨集中在7—9月,年平均降水量555 mm,年蒸发量1 181.6 mm,相对湿度69%,干燥度0.95~1.28。

该区域地处森林草原过渡带,长期的农垦历史与人类活动造成植被严重破坏,覆盖率较低。20世纪70年代中后期开始大面积退耕还林,现有植被均是近40 a来人工营造,刺槐是该区主要的乔木树种,占整个林分面积的92%;其他造林树种有山杨(*Populus davidiana*)、旱柳(*Salix matsudana*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)、侧柏(*Biota orientalis*)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等。立体结构林分少,林下草本植物主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*)等[8]。

2 研究方法

2.1 样地设置

选择研究区内有代表性的不同坡位的4块刺槐人工林样地进行土壤取样和观测,样地规格为20 m×20 m。对样地进行每木检尺和林分调查,各样地基本情况见表1。

2.2 土壤物理性质测定

于2016年8月采用环刀法[13]测定土壤物理性质,其指标包括土壤容重、饱和持水量、毛管持水量、非毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度。测定深度为0~100 cm,各样地挖深度为1 m的土壤剖面,按0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm用环刀取土,每层取2个环刀,每个样地取3个重复。

表1 样地基本情况

Tab.1 Basic information of the sample plots

地形部位	坡向	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	坡度/(°)	海拔/m	郁闭度	密度/(株·hm^{-2})
塬面刺槐林(上)	阴坡	25	12.3	12.38	2	1 315	0.83	1600
塬面刺槐林(下)	半阴坡	30	14.8	13.36	15	1 256	0.82	2196
墚坡刺槐林	半阳坡	35	6.9	8.45	35	1 208	0.87	4563
沟台刺槐林	半阳坡	20	6.5	6.58	17	1 149	0.86	5400

2.3 土壤水分测定

于2018年5—9月每月的15日和30日用烘干法测定土壤水分。取样深度为0~100 cm,按0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm分6层用土钻取土,每个样地取3个重复。土壤含水量采用烘干称重法测定,烘干温度为105 ℃,烘干时间12 h以上,使土壤中水分蒸发至恒重。

2.4 降雨量测定

根据放置在试验区附近的虹吸式雨量计获取降雨数据,个别缺失数据由研究区自动气象站补充获得。

2.5 数据统计分析

采用Excel 2010进行图表生成,用SPSS 19.0的Duncan's多重比较法进行土壤水文物理性质差异性分析及土壤水分的季节差异分析。

3 结果及分析

3.1 刺槐人工林土壤水文物理性质

3.1.1 土壤容重、孔隙度的坡位差异 土壤容重、孔隙度是土壤中水分、养分、微生物等的重要通道与活动场所,也是土壤物理性质的重要指标[14]。从表2可以看出,0~100 cm土层的土壤容重存在显著差异($P<0.05$),总体上随土层深度增加而增大。土壤容重均值为:塬面刺槐林(上)(1.24 g·cm^{-3})>塬面刺槐林(下)(1.20 g·cm^{-3})>沟台刺槐林

表 2 不同坡位刺槐人工林 0 ~ 100 cm 土壤容重和孔隙度

Tab. 2 Soil bulk density and porosity of 0 – 100 cm soil layer under artificial *Robinia pseudoacacia* forest at different slope positions

坡位	土层深度/cm	土壤容重/($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
塬面刺槐林(上)	0 ~ 10	1.07 ±0.06a	53.44 ±0.65ab	43.27 ±5.28a	10.17 ±5.12a
	10 ~ 20	1.15 ±0.07ab	52.97 ±3.99a	44.63 ±6.75a	8.35 ±2.79b
	20 ~ 40	1.21 ±0.06ab	52.47 ±3.71ab	41.09 ±2.46a	11.38 ±1.77a
	40 ~ 60	1.31 ±0.04a	46.38 ±1.15b	42.22 ±1.23a	4.16 ±1.97b
	60 ~ 80	1.35 ±0.03a	45.04 ±0.59c	42.58 ±0.67ab	2.46 ±0.53c
	80 ~ 100	1.37 ±0.05a	44.73 ±1.12b	42.10 ±0.19ab	2.64 ±1.02b
	0 ~ 100	1.24	49.17	42.65	6.52
塬面刺槐林(下)	0 ~ 10	1.01 ±0.09a	57.40 ±0.44a	41.46 ±2.22a	15.94 ±2.34a
	10 ~ 20	1.33 ±0.13a	46.35 ±4.94a	38.79 ±0.99a	7.56 ±4.04b
	20 ~ 40	1.29 ±0.05a	48.37 ±1.79b	43.06 ±2.38a	5.32 ±2.03b
	40 ~ 60	1.21 ±0.07a	51.25 ±2.98a	42.76 ±1.14a	8.49 ±1.98a
	60 ~ 80	1.24 ±0.07b	48.22 ±1.58b	43.81 ±1.58a	4.42 ±1.49bc
	80 ~ 100	1.20 ±0.06b	50.68 ±0.80a	40.88 ±2.59b	9.80 ±2.66a
	0 ~ 100	1.21	50.38	41.79	8.59
梁坡刺槐林	0 ~ 10	1.04 ±0.05a	51.60 ±3.65b	38.23 ±1.50a	13.37 ±2.16a
	10 ~ 20	1.09 ±0.08b	52.68 ±1.79a	37.67 ±2.04a	15.01 ±2.89a
	20 ~ 40	1.22 ±0.05ab	50.04 ±1.34ab	40.77 ±1.12a	9.27 ±1.36ab
	40 ~ 60	1.21 ±0.05a	51.62 ±0.89a	43.81 ±1.35a	7.81 ±1.93a
	60 ~ 80	1.19 ±0.04b	52.23 ±0.70a	43.63 ±1.67a	8.60 ±1.33a
	80 ~ 100	1.20 ±0.04b	51.63 ±0.52a	44.53 ±0.56a	7.10 ±0.50a
	0 ~ 100	1.16	51.64	41.44	10.19
沟台刺槐林	0 ~ 10	0.99 ±0.10a	55.61 ±2.39ab	40.43 ±1.61a	15.18 ±3.99a
	10 ~ 20	1.14 ±0.11ab	52.86 ±2.30a	39.35 ±0.84a	13.51 ±2.48ab
	20 ~ 40	1.16 ±0.07b	53.63 ±1.11a	42.34 ±4.00a	11.29 ±2.93a
	40 ~ 60	1.30 ±0.04a	47.44 ±1.63b	41.77 ±1.40a	5.67 ±0.67ab
	60 ~ 80	1.34 ±0.04a	45.51 ±1.58c	40.36 ±0.51b	5.15 ±1.09b
	80 ~ 100	1.21 ±0.04b	50.58 ±1.95a	43.57 ±1.56ab	7.01 ±0.50a
	0 ~ 100	1.19	50.94	41.30	9.64

注:小写字母 a、b、c 表示差异显著性 $P = 0.05$ 水平,同一列相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著。采用 Duncan's 多重比较法。下同。

(1.18 $g \cdot cm^{-3}$) > 梁坡刺槐林(1.16 $g \cdot cm^{-3}$)。塬面刺槐林土壤容重均大于梁坡和沟台刺槐林,梁坡刺槐林各层土壤容重略高于沟台刺槐林,这与坡位因素及造林密度都有关系,也可能与刺槐根系分布状况及枯落物分解情况有关。

土壤孔隙大小及分布对土壤水分贮存数量和运动速度起着决定作用[15],孔隙度愈大,则土壤愈疏松,透水性愈好。由表 2 可知,刺槐人工林土壤总孔隙度为 49.17% ~51.64%,不同坡位刺槐林同一土层间的土壤总孔隙度与非毛管孔隙度存在显著差异($P<0.05$),总孔隙度为:梁坡刺槐林 > 沟台刺槐林 > 塬面刺槐林(下) > 塬面刺槐林(上);毛管孔隙度为:塬面刺槐林(上) > 塬面刺槐林(下) > 梁坡刺槐林 > 沟台刺槐林;非毛管孔隙度为:梁坡刺槐林 > 沟台刺槐林 > 塬面刺槐林(下) > 塬面刺槐林(上)。非毛管孔隙度决定了土壤的贮水能力,反映出梁坡刺槐林土壤持水能力优于沟台刺槐林和塬面刺槐林。

3.1.2 土壤持水量的坡位差异 土壤饱和持水量是毛管水和非毛管水达到饱和时的土壤蓄水量,反映土壤贮存和调节水分的潜在能力[15-16]。毛管水是植物生存的基础,可为植物根毛及土壤中细菌所利用,非毛管持水主要受重力作用向下运动,运动速度较快,起到调蓄洪峰的作用,是衡量森林水源涵养

表 3　不同坡位刺槐人工林 0 ~ 100 cm 土层的持水能力

Tab. 3　Moisture holding capacity of 0 – 100 cm soil layer under artificial *Robinia pseudoacacia* forest at different slope positions

坡位	饱和持水量 /mm	毛管持水量 /mm	非毛管持水量 /mm
塬面刺槐林(上)	485.28	426.29	58.99
塬面刺槐林(下)	502.37	421.30	81.07
墚坡刺槐林	519.14	422.05	97.08
沟台刺槐林	506.99	419.61	87.38

能力的重要指标之一[17]。由表 3 可知,1 m 土层内,土壤饱和持水量依次为:墚坡刺槐林(519.14 mm)>沟台刺槐林(506.99 mm)>塬面刺槐林(下)(502.37 mm)>塬面刺槐林(上)(485.28 mm),说明墚坡刺槐林的蓄水能力高于其他刺槐林,毛管持水量表现为:塬面刺槐林(上)(426.29 mm)>墚坡刺槐林(422.05 mm)>塬面刺槐林(下)(421.30 mm)>沟台刺槐林(419.61 mm),非毛管持水量为:墚坡刺槐林(97.08 mm)>沟台刺槐林(87.38 mm)>塬面刺槐林(下)(81.07 mm)>塬面刺槐林(上)(58.99 mm),表明墚坡刺槐林持水能力较好,沟台刺槐林次之,塬面刺槐林较差,这可能是因为墚坡与沟台刺槐林种植密度大,根系分布密集,增加了土壤的孔隙度,使持水能力增加。

3.2　刺槐人工林地土壤水分变化特征

3.2.1　不同地形部位刺槐人工林土壤水分季节变化　立地条件直接影响着林地水分状况。由表 4 可知,2 个塬面刺槐林土壤水分在 5 月差异显著,6、7、8 月差异极显著,9 月无显著差异;塬面刺槐林(上)与墚坡刺槐林、塬面刺槐林(下)与墚坡刺槐林在 6 月分别为极显著和显著差异,5、7、8、9 月为极显著差异;塬面刺槐林(上)与沟台刺槐林在各月均为极显著差异;塬面刺槐林(下)与沟台刺槐林在 6 月差异显著,5、7、8 月差异极显著,9 月无显著差异;墚坡刺槐林与沟台刺槐林在 5、6、9 月无显著差异,7、8 月差异极显著。

降雨是刺槐生长的主要水分补给源,降雨分配及其有效性直接影响土壤水分动态[18]。图 1 表明,土壤水分随刺槐生长与降雨量呈相似变化趋势,且季节变化差异明显。据马骥等[19]对六盘山海子沟小流域典型乔木林土壤水分季节变化的划分,本研究根据刺槐生长季降雨量呈现出低—高—低的趋势,将土壤水分季节变化划分为:消耗期(5—6 月)、补给期(7 月)、消退期(8—9 月)。

(1) 消耗期:5 月初刺槐开始发芽,气温低蒸腾作用弱,期间有 51.2 mm 的降雨,加之前一年土壤水分的后期积累,使土壤水分保持在较高水平。

表 4　不同地形部位刺槐林土壤含水量差异显著性分析

Tab. 4　Analyzed results of the difference of soil moisture content under artificial *Robinia pseudoacacia* forest in different landforms

坡位	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
塬面刺槐林(上)	18.49Aa	17.51Aa	19.91Aa	17.58Aa	18.06Aa
塬面刺槐林(下)	16.65Ab	13.96Bb	18.11Bb	14.12Bb	15.64ABa
墚坡刺槐林	10.82Bc	11.16Bc	15.48Dd	12.16Cc	10.04Cb
沟台刺槐林	11.75Bc	11.60Bc	16.21Cc	9.72Dd	11.90BCb

注:大写字母 A、B、C 表示差异显著性 $P = 0.01$ 水平,同一列相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著。采用 Duncan's 多重比较法。

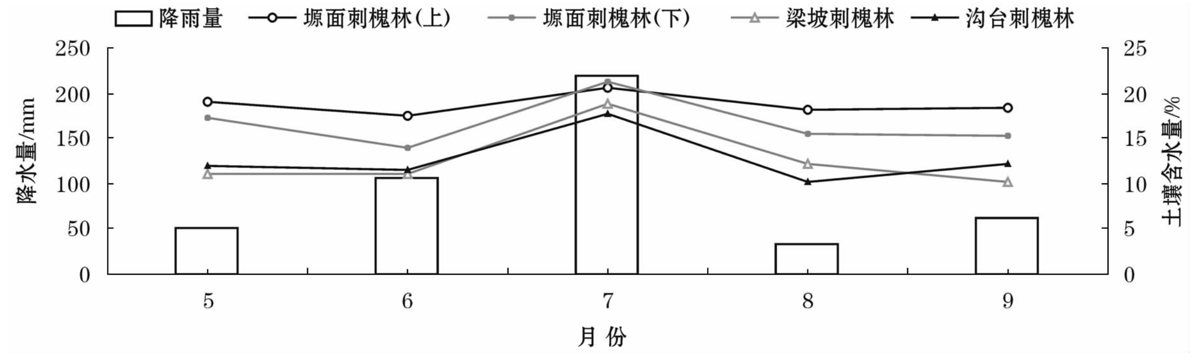


图 1　不同地形部位人工刺槐林地土壤水分的季节变化

Fig. 1　Seasonal variation of soil moisture content under artificial *Robinia pseudoacacia* forest in different landforms

6 月气温回升快,表层土壤蒸发加快,土壤水分消耗大于补给,土壤含水率出现最低值。

(2) 补给期:7 月气温大幅升高,土壤蒸发和刺槐蒸腾大量削弱土壤水分,但由于进入雨季,219.6 mm 的大气降水达年生长季降雨最大值,土壤水分得以补充并迅速提高,达到一年中含水率峰值。

(3) 消退期:8 月降雨急剧减少,土壤蒸发旺盛,土壤水分逐渐下降,9 月降水减少,气温降低,表层土壤蒸发减弱,刺槐生长进入末期,对水分需求降低,土壤水分进入消退期。

在年生长季中,不同坡位刺槐人工林土壤水分差异显著,平均土壤含水量为:塬面刺槐林(上)(18.71%)>塬面刺槐林(下)(16.64%)>沟台刺槐林(12.74%)>梁坡刺槐林(12.68%)。

3.2.2 不同地形部位刺槐人工林土壤水分垂直分布 图 2 反映了刺槐林年生长季 5—9 月各样地土壤水分垂直分布情况。5 月土壤水分垂直变化明显,塬面刺槐林(上)与沟台刺槐林土壤水分从 0 ~ 20 cm 土层逐渐降低,自 20 cm 后又逐渐增加,塬面刺槐林(下)从 0 ~ 60 cm 土层逐渐降低,自 60 cm 后逐渐增加并趋于稳定;梁坡刺槐林从 0 ~ 40 cm 土层逐渐降低,40 cm 后逐渐增加,变化速率平稳。6 月各样地土壤水分垂直变化剧烈,在 0 ~ 60 cm 土层土壤水分均逐渐减小,自 60 cm 后塬面刺槐林(上)呈先增加后降低的趋势,其他样地含水率逐渐回升略有增加,土壤水分最大值均出现在土壤表层。7 月土壤水分垂直分布呈波动变化,塬面刺槐林(上)以 20 cm 土层为拐点,自上而下表现出先降低后增加的趋势,其余样地均呈先迅速降低又略有增加再逐渐降低的趋势,塬面刺槐林(上)土壤水分最大值出现在 80 ~ 100 cm 土层。8 月,塬面刺槐林(下)与沟台刺槐林土壤水分均随土层深度的增加而不断降

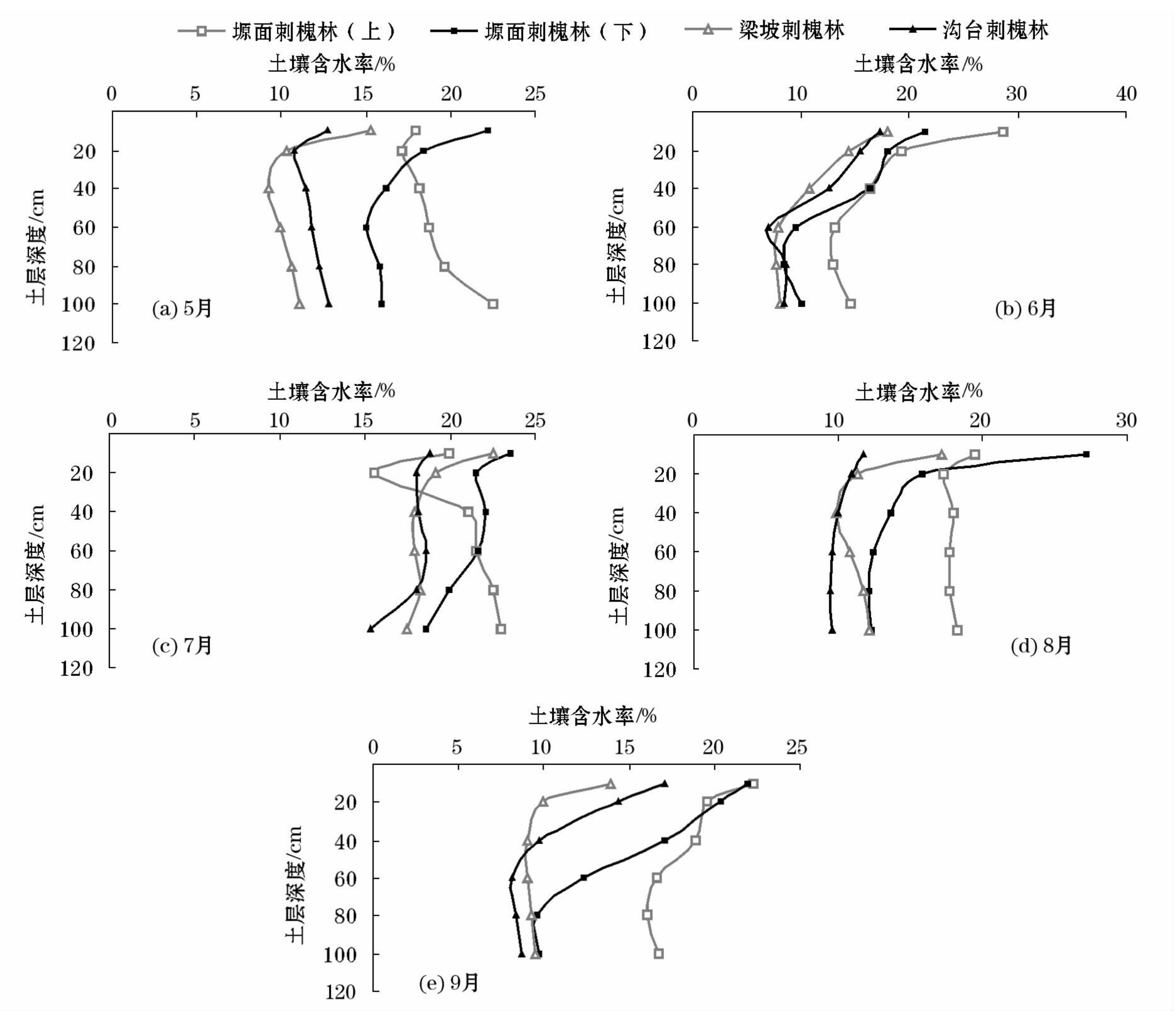


图 2 不同地形部位人工刺槐林地土壤水分的垂直变化

Fig. 2 Vertical variation of soil moisture content under artificial *Robinia pseudoacacia* forest in different landforms

低,墚坡刺槐林与塬面刺槐林(上)在 0 ~ 20 cm 土层范围内含水率逐渐降低,之后略有回升并趋于稳定;9 月各刺槐林样地土壤水分随土层深度增加而降低,在 60 cm 以后略有回升且趋于稳定。

表层土壤水分垂直变化受降雨、林冠截留、林下植被及地形地貌等环境因素综合影响,随土层加深土壤水分受环境影响减弱,采用变异系数划分土壤剖面含水量的变化层次,能更好地表现出土壤水分的变化规律。表 5 为不同地形部位刺槐人工林年生长季平均土壤含水量及变异系数,根据变异系数把土壤剖面划分为:活跃层、次活跃层和相对稳定层[19-20]。塬面刺槐林(下)及沟台刺槐林在 40 ~ 80 cm 土层、墚坡刺槐林 20 ~ 100 cm 土层为活跃层($Cv > 0.3$),变异系数大,说明环境因子对该层土壤水分影响较大;塬面刺槐林(下)在 20 ~ 40 cm 土层为相对稳定层($Cv < 0.1$),该层土壤水分变化较为稳定,受环境影响较小;次活跃层($0.1 < Cv < 0.3$)出现在塬面刺槐林(上)0 ~ 20 cm 土层和 40 ~ 100 cm 土层、塬面刺槐林(下)及沟台刺槐林 0 ~ 40 cm、80 ~ 100 cm 土层、墚坡刺槐林 0 ~ 20 cm 土层,刺槐林根系主要从该层吸收土壤水分,植被的蒸腾及生长用水影响该层土壤水分的变化。

表 5 不同地形部位人工刺槐林土壤含水量均值及变异系数

Tab. 5 Average values and variable coefficients of soil moisture content under artificial *Robinia pseudoacacia* forest in different landforms

土层深度 /cm	塬面刺槐林(上)			塬面刺槐林(下)			墚坡刺槐林			沟台刺槐林		
	平均值 /%	标准差	变异系数	平均值 /%	标准差	变异系数	平均值 /%	标准差	变异系数	平均值 /%	标准差	变异系数
0 ~ 10	21.65	4.2	0.19	23.25	2.33	0.1	17.39	3.27	0.19	15.51	3.09	0.2
10 ~ 20	17.77	1.7	0.1	18.79	2.22	0.12	13.05	3.83	0.29	15.19	4.35	0.29
20 ~ 40	18.5	1.71	0.09	17.08	3.06	0.18	11.35	3.73	0.33	12.39	3.43	0.28
40 ~ 60	17.54	3.07	0.18	14.17	4.59	0.32	11.09	3.94	0.35	11.04	4.59	0.42
60 ~ 80	17.79	3.61	0.2	13.17	4.71	0.36	11.53	4.01	0.35	11.36	4.01	0.35
80 ~ 100	19.02	3.68	0.19	13.37	3.81	0.29	11.68	3.57	0.31	10.97	2.97	0.27

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究表明,在泾川中沟小流域,不同坡位刺槐人工林 0 ~ 100 cm 土壤容重随土层加深而增大,孔隙度随土层加深而减小,这与顾宇书等[16]、王正安等[21]的研究结果一致。总孔隙度在 44.89% ~ 57.52%,与鲁绍伟等[22]发现的中国大部分森林生态系统土壤总孔隙度(40% ~ 60%)保持一致。土壤容重以塬面刺槐林(上)最大,墚坡刺槐林最小,而土壤总孔隙度以墚坡刺槐林最大,沟台刺槐林与塬面刺槐林(下)次之,塬面刺槐林上最小,这是因为墚坡刺槐林密度与林龄较大,根系分布广泛,增加了孔隙数量。不同坡位对土壤持水性影响有显著差异,墚坡刺槐林饱和持水量最大,塬面刺槐林(上)饱和持水量最低,这与吕殿青等[12]、孙中峰等[23]对不同坡位土壤持水性能的研究结果相近。土壤持水量与土层厚度及孔隙度密切相关,墚坡刺槐林土壤总孔隙与非毛管孔隙均最大,所以持水性能最好。

对土壤水分动态变化的研究表明,季节变化差异显著,根据刺槐生长季降雨量呈现出低—高—低的趋势,将土壤水分季节变化划分为:消耗期(5—6 月)、补给期(7 月)、消退期(8—9 月)。在消退期的 5—6 月降雨增加但土壤水分下降,主要是因为刺槐生长初期对水分需求大以及林地蒸发旺盛导致的水分消耗远大于补给,这与马骥等[19]、孔亮等[24]的研究结果相似。7 月降雨达到刺槐年生长季最大值,土壤水分得以补充并迅速提高,达到一年中含水率峰值。8、9 月降雨减少,刺槐生长进入末期,土壤水分逐渐消退。4 个刺槐林地土壤水分垂直分布变化趋势存在相似性,普遍表现出表层含水率最大,随土层加深水分递减后而趋于稳定。墚坡刺槐林持水性能最好,但年生长季中土壤水分条件最差,而塬面刺槐林(上)土壤含率最好,产生这一矛盾的主要原因是墚坡刺槐林坡度为 35°,坡度较陡不利于土壤水分下渗,而塬面刺槐林(上)仅为 2°,降雨除蒸发以外基本不产生径流,更有利于水分入渗,坡度的巨大差异使得土壤含水率产生差异;另一方面,墚坡刺槐

林密度大，根系分布广泛，在增加土壤孔隙度的同时也使得根系耗水量增加，这就导致了土壤水分降低。从变异系数来看，刺槐人工林地表层（0～20 cm）属于次活跃层（$0.1<Cv<0.3$），随土层加深出现活跃层（$Cv>0.3$），之后又出现次活跃层，这与陈洪松等[25]、苏莹等[26]发现的随土层深度增加土壤水分变异系数降低的结论不同，可能与本研究独特的小气候条件及研究土层较浅有关，这一结论或许可作为本研究区刺槐人工林特有的水分规律。

本研究仅用一个生长季的监测数据做分析，缺少多年的纵向比较，仅从坡位差异的角度来分析水分特征，未能综合考虑林龄、坡度、坡向等的影响，在对本地区生态建设提供理论依据的同时尚有欠缺，今后的研究还需综合考虑各影响因子，以期对土壤水分特征进行更全面的研究。

4.2 结论

（1）泾川中沟小流域不同坡位刺槐人工林土壤物理性质存在显著差异，0～100 cm 土层土壤容重为：塬面刺槐林（上）（1.24 $g\cdot cm^{-3}$）>塬面刺槐林（下）（1.20 $g\cdot cm^{-3}$）>沟台刺槐林（1.18 $g\cdot cm^{-3}$）>墚坡刺槐林（1.16 $g\cdot cm^{-3}$）。土壤总孔隙度以墚坡刺槐林（51.99%）最大，其次是沟台刺槐林（51.31%）和塬面刺槐林（下）（50.52%），塬面刺槐林（上）（49.33%）最小。非毛管孔隙度为：墚坡刺槐林>沟台刺槐林>塬面刺槐林（下）>塬面刺槐林（上）。墚坡刺槐林的饱和持水量（519.14 mm）与非毛管持水量（97.08 mm）均最大。

（2）各林地土壤水分变化季节性差异明显，可分为土壤水分消耗期（5—6 月）、补给期（7 月）、消退期（8—9 月）；不同林地土壤含水量变异系数随土层深度加深表现为先增大后减小，土壤水分变异系数在 40～80 cm 土层达到了最大值（$Cv>0.3$）。塬面刺槐林（上）的土壤含水量最大，塬面刺槐林（下）与沟台刺槐林居中，墚坡刺槐林土壤水分最低。

参考文献（References）：

〔1〕 Montzka C，Moradkhani H，Weihermuller L，et al. Hydraulic parameter estimation by remotely-sensed top soil moisture observations with the particle filter〔J〕. Journal of Hydrology，2011，399（34）：410－421.

〔2〕 陈丽华，鲁绍伟，张学培，等. 晋西黄土区主要造林树种林地土壤水分生态条件分析〔J〕. 水土保持研究，2008，15（1）：79－86.〔Chen Lihua，Lu Shaowei，Zhang Xuepei，et al. Analysis of soil water content of main afforestation species in western Shanxi of Loess Plateau〔J〕. Research of Soil and Water Conservation，2008，15（1）：79－86.〕

〔3〕 常译方，毕华兴，高路博，等. 晋西黄土区刺槐和油松林地土壤水分动态变化〔J〕. 中国水土保持科学，2014，12（4）：21－27.〔Chang Yifang，Bi Huaxing，Gao Lubo，et al. Dynamic changes of soil moisture in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* forestlands in loess region of Western Shanxi Province〔J〕. Science of Soil and Water Conservation，2014，12（4）：21－27.〕

〔4〕 单长卷，梁宗锁，郝文芳. 黄土高原刺槐林生长与土壤水分关系研究进展〔J〕. 西北植物学报，2003，23（8）：1 341－1 346.〔Shan Changjuan，Liang Zongsuo，Hao Wenfang. Review on growth of locust and soil water in Loess Plateau〔J〕. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2003，23（8）：1 341－1 346.〕

〔5〕 韩恩贤，韩刚. 渭北高原沟壑区主要立地类型水热变化及对刺槐生长影响研究〔J〕. 干旱区资源与环境，2005，19（5）：195－198.〔Han Enxian，Han Gang. Effect of water and heat changes of main site types on the growth of *Robinia pseudoacacia* L. on Weibei Loess Plateau ravine region〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment，2005，19（5）：195－198.〕

〔6〕 黄艳丽，李占斌，苏辉，等. 人工林对黄土高原小流域上下游不同坡面土壤水分的影响〔J〕. 农业工程学报，2018，34（15）：108－116.〔Huang Yanli，Li Zhanbin，Su Hui，et al. Effect of man-made forest on soil moisture of different slopes in upper and lower reaches of small watershed of Loess Plateau〔J〕. Transactions of the CSAE，2018，34（15）：108－116.〕

〔7〕 董起广，张扬，陈田庆，等. 黄土高原丘陵沟壑区小流域坡面土壤水分分布特征〔J〕. 中国农村水利水电，2018（7）：65－73.〔Dong Qiguang，Zhang Yang，Chen Tianqing，et al. Soil moisture distribution characteristics of small catchment slope in the Loess Plateau hilly-gully Region〔J〕. China Rural Water and Hydropower，2018（7）：65－73.〕

〔8〕 韩芬，任烨，王彦辉，等. 甘肃泾川刺槐林地穿透雨对降雨的响应〔J〕. 人民黄河，2015，37（7）：90－94.〔Han Fen，Ren Ye，Wang Yanhui，et al. Responses of throughfall to precipitation in black locust plantation at Jingchaun of Gansu〔J〕. Yellow River，2015，37（7）：90－94.〕

〔9〕 甘淼，贾玉华，李同川，等. 黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析〔J〕. 干旱区研究，2018，35（2）：315－324.〔Gan Miao，Jia Yuhua，Li Tongchuan，et al. Variation of soil bulk density，saturated hydraulic conductivity and soil moisture content in a slope-gully unit on the Northern Loess Plateau〔J〕. Arid Zone Research，2018，35（2）：315－324.〕

〔10〕 何福红，黄明斌，党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征〔J〕. 水土保持通报，2002，4（2）：6－9.〔He Fuhong，Huang Mingbin，Dang Tinghui. Soil water distribution characteristics in Wangdonggou watershed in gully region of Loess Plateau〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation，2002，4（2）：6－9.〕

〔11〕 景元书,范永强. 低丘红壤不同坡位持水特性的比较〔J〕. 江西农业学报,2007,19(3):26-28.〔Jing Yuanshu,Fan Yongqiang. Slope position difference of red soil water retention in low hilly area〔J〕. Acta Agriculturae Jiangxi,2007,19(3):26-28.〕

〔12〕 吕殿青,潘云. 六道沟流域不同坡位不同土地利用方式下的土壤持水特征研究〔J〕. 中国农学通报,2008,24(8):279-282.〔Lü Dianqing,Pan Yun. Study on soil retention characteristics of different position of slope of soil under different land uses in Liudaogou basin〔J〕. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008,24(8):279-282.〕

〔13〕 中华人民共和国林业行业标准. 森林土壤分析方法〔M〕. 北京:中国标准出版社,1999:1-108.〔Forestry Industry Standard of the People's Republic of China. Forest Soil Analysis Method〔M〕. Beijing:China Standards Press,1999:1-108.〕

〔14〕 王光玉. 杉木混交林水源涵养和土壤性质研究〔J〕. 林业科学,2003,39(专刊1):15-20.〔Wang Guangyu. Study on water conservation and soil properties of Chinese fir mixed stands〔J〕. Scientia Silvae Sinicae,2003,39(Special Issue 1):15-20.〕

〔15〕 马雪华. 森林水文学〔M〕. 北京:中国林业出版社,1993:92-93.〔Ma Xuehua. Forest Hydrology〔M〕. Beijing:China Forestry Press,1993:92-93.〕

〔16〕 顾宇书,邢兆凯,韩友志,等. 浑河上游4种典型水源林土壤物理性质及其水源涵养功能〔J〕. 东北林业大学学报,2013,41(1):37-41.〔Gu Yushu,Xing Zhaokai,Han Youzhi,et al. Soil physical properties and water conservation function of four typical conservation forest in upper reaches of Hunhe River〔J〕. Journal of Northeast Forestry University,2013,41(1):37-41.〕

〔17〕 王忠诚,邓秀秀,崔卓卿,等. 洞庭湖区主要森林类型土壤持水性能研究〔J〕. 中南林业科技大学学报,2016,36(5):79-84.〔Wang Zhongcheng,Deng Xiuxiu,Cui Zhuoqing,et al. Research on water holding capacity of forest soil around Dongting Lake〔J〕. Journal of Central South University of Forestry Science and Technology,2016,36(5):79-84.〕

〔18〕 黄枝英,史宇,焦一之,等. 北京山区典型人工林土壤水分动态研究〔J〕. 干旱区资源与环境,2012,26(11):166-171.〔Huang Zhiying,Shi Yu,Jiao Yizhi,et al. Soil water dynamics of typical plantations in Beijing mountainous region〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(11):166-171.〕

〔19〕 马骥,张维江. 六盘山地区不同林地土壤水分动态变化特征初探〔J〕. 宁夏工程技术,2016,15(2):167-170.〔Ma Ji,Zhang Weijiang. The dynamic change characteristics of soil water content in different forestland in Liupan Mountain area〔J〕. Ningxia Engineering Technology,2016,15(2):167-170.〕

〔20〕 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究〔J〕. 生态学报,1995,15(2):178-184.〔Wang Mengben,Li Hongjian. Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantations in the Loess Plateau region in Northwest Shanxi〔J〕. Acta Ecologica Sinica,1995,15(2):178-184.〕

〔21〕 王正安,邸利,王彦辉,等. 六盘山叠叠沟小流域4种植被土壤层水文调节功能的综合评价〔J〕. 干旱区资源与环境,2017,31(11):181-187.〔Wang Zhengan,Di Li,Wang Yanhui,et al. Comprehensive evluation on the hydrological adjusting function of soils in four vegetation types in the small watershed of Diediegou,Liupan Mountains〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(11):181-187.〕

〔22〕 鲁邵伟,毛富玲,靳芳,等. 中国森林生态系统水源涵养功能〔J〕. 水土保持研究,2005,12(4):223-226.〔Lu Shaowei,Mao Fuling,Jin Fang,et al. The water resource conservation of forest ecosystem in China〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2005,12(4):223-226.〕

〔23〕 孙中峰,张学培,刘卉芳,等. 晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究〔J〕. 干旱区研究,2004,21(4):343-347.〔Sun Zhongfeng,Zhang Xuepei,Liu Huifang,et al. Study on the water-conserving capabilities of soils under the sloped woodlands in the Loess area in West Shanxi Province〔J〕. Arid Zone Research,2004,21(4):343-347.〕

〔24〕 孔亮,蒙宽宏,陈宇,等. 黑龙江省东部山地灌木林土壤水分动态变化〔J〕. 东北林业大学学报,2005,33(5):44-46.〔Kong Liang,Meng Kuanhong,Chen Yu,et al. Soil water dynamic of several species of shrubs in east mountainous areas of Heilongjiang province〔J〕. Journal of Northeast Forestry University,2005,33(5):44-46.〕

〔25〕 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征〔J〕. 应用生态学报,2005,16(10):1 853-1 857.〔Chen Hongsong,Shao Mingan,Wang Kelin. Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2005,16(10):1 853-1 857.〕

〔26〕 苏莹,陈林,李月飞,等. 荒漠草原不同类型土壤水分时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(6):1 308-1 316.〔Su Ying,Chen Lin,Li Yuefei,et al. Spatiotemporal variation of moisture content of different soil types in desert steppe〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(6):1 308-1 316.〕

Soil Moisture Content under Artificial *Robinnia pseudoacacia* Forest at Different Slope Positions in the Zhonggou Minor Basin, Jingchuan County, Gansu Province

ZHANG Xiao-mei[1], DI Li[1], SHI Zai-jun[2], FEI Jun-e[1], WANG Zheng-an[3]

(1. *College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*;
2. *Guanshan Forest Farm in Jingchuan County, Pingliang* 744306, *Gansu, China*;
3. *Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry, Guyuan* 756000, *Ningxia, China*)

Abstract: The soil hydrophysical properties under the artificial *Robinia pseudoacacia* forests in different landforms in a minor drainage basin in Jingchuan County, Gansu Province were measured using the "ring knife" method, and the soil moisture content was also measured using the oven drying method. The soil bulk density in 0 – 100 cm soil layer under the *R. pseudoacacia* plantations at different slope positions was in an order of the *R. pseudoacacia* forest on the hill top (1.24 $g \cdot cm^{-3}$) > *R. pseudoacacia* forest at the gully bottom (1.20 $g \cdot cm^{-3}$) > *R. pseudoacacia* forest (1.18 $g \cdot cm^{-3}$) > *R. pseudoacacia* forest on the hill slope (1.16 $g \cdot cm^{-3}$). The total soil porosity was in an order of the *R. pseudoacacia* forest on the hill slope (51.99%) > *R. pseudoacacia* forest in the gully (51.31%) > *R. pseudoacacia* forest at the tableland bottom (50.52%) > *R. pseudoacacia* forest at the tableland top (49.33%). The saturation moisture capacity and non-capillary moisture capacity of soil under the *R. pseudoacacia* forest on the hill slope were both the highest, then those under the *R. pseudoacacia* forests in gully and at the tableland bottom, and they were the lowest under the *R. pseudoacacia* forest on the hill top. The seasonal variation of soil moisture content under the forest was obvious, which could be divided into the soil moisture consumption period (from May to June), soil moisture supply period (July) and soil moisture reduction period (from August to September). The variable coefficient of soil moisture content under the forests in different landforms was increased at first and then decreased with the increase of soil depth, and it reached the highest value ($Cv > 0.3$) in 40 – 80 cm soil layer. The results revealed that the soil moisture content was the highest under the *R. pseudoacacia* forest on the hill top, and then under the forests at the gully bottom and the on the gully tableland, and it was the lowest on the hill slope.

Key words: *Robinia pseudoacacia*; plantation; soil moisture content; hydrophysical property; slope; dynamic change; Gansu Province